

**Луц Василий, к.т.н.**

**Лоик Василий, к.т.н.**

**Штангрет Назар, адъюнкт**

*институт пожарной и техногенной безопасности,*

*Львовский государственный университет безопасности*

*жизнедеятельности*

**Матушкевич Рафал, адъюнкт**

*Факультет инженерии пожарной безопасности*

*Главная школа пожарной службы*

## **ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВ НА ДИСПЕРСНОСТЬ КАПЕЛЬ ВОДЫ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ И СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЪЕМАХ ПОМЕЩЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА**

В статье рассмотрены устройства для осаждения продуктов горения, снижение температуры в объеме помещения и увеличение видимости. Основное внимание уделялось выбору способа распыления воды на мелкодисперсные частицы, влияния скорости потока воздуха на дисперсность капель, которые выходят из центробежной форсунки. Целью исследования является развитие метода расчета одного из главных параметров модели – эквивалентного диаметра капель струи распыленной воды. Ранее определение этого параметра было возможно лишь с помощью сложных экспериментальных измерений. В данной работе для его расчета применены ранее опубликованные литературные данные. Формула, полученная в работе, позволяет выполнять расчет эквивалентного диаметра капель на основе конструктивных параметров. Графические зависимости, полученные с помощью формулы, позволили определить зависимость эквивалентного диаметра капель от технических параметров. Применение формулы к математической модели теплозащиты позволило расширить ее возможности для практического применения. Также предлагается методика расчёта теплопоглощения порции воды в зависимости от диаметра монодиспергированных водяных капель и влияние дисперсности на интенсивность подачи воды для обеспечения тушения очага пожара.

**Ключевые слова:** опасные факторы пожара, дым и продукты горения, снижение температуры, осаждение продуктов горения, дисперсность капель воды, увеличение видимости, классификация способов распыления воды, пневмо-гидравлическое распыления, центробежные форсунки, эквивалентный диаметр капель.

## **Investigation of the Influence of Structural Elements Devices on Dispersed Water Droplets to Precipitate the Product of Combustion and Reduce the Temperature in the Volume of the Room During a Firer**

### **Abstract**

In the article, are considered devices for depositing combustion products, reducing the temperature in the room volume and increasing visibility. The main attention was paid to the choice of the method for atomizing water into fine particles, the effect of air flow velocity on the dispersion of droplets that leave the centrifugal nozzle. The purpose of the study is to develop a method for calculating one of the main parameters of the model – the equivalent diameter of the droplets of a spray of water. Earlier, the definition of this parameter was possible only with the help of complex experimental measurements. In this paper, previously published literature data are used to calculate it. The formula obtained in the work makes it possible to calculate the equivalent droplet diameter on the basis of design parameters. Graphic dependencies obtained with the help of the formula made it possible to determine the dependence of the equivalent droplet diameter on technical parameters. Application of the formula to the mathematical model of heat protection has allowed expanding its possibilities for practical application. Also, a method is proposed for calculating the heat absorption of a portion of water as a function of the diameter of monodispersed water droplets and the effect of dispersion on the intensity of the water supply in order to extinguish the fire.

**Keywords:** hazardous fire factors, smoke and combustion products, temperature decrease, combustion products precipitation, water droplet dispersion, visibility increase, classification of water spraying methods, pneumo-hydraulic spraying, centrifugal nozzles, equivalent droplet diameter

## Wpływ elementów konstrukcyjnych urządzeń do wytwarzania rozproszonych strumieni wody na zmniejszenie produktów spalania i redukcje temperatury podczas pożaru

### Abstrakt

W artykule opisano wpływ dysz wodnych na redukcje produktów spalania, obniżenie temperatury w pomieszczeniu, a także poprawę widoczność w pożarze. Główną uwagę zwrócono na wybór metody rozpylania wody na drobne cząstki oraz wpływ prędkości przepływu powietrza na dyspersję kropelek powstających w dyszach. Celem badania było opracowanie metody obliczania jednego z głównych parametrów modelu – równoważnej średnicy kropelek rozpylanej wody. Dotychczas definicja tego parametru była możliwa do określenia tylko przy pomocy złożonych pomiarów doświadczalnych. W niniejszym artykule do określenia pożądanego parametru wykorzystano dane literaturowe. Wzór uzyskany w pracy pozwala obliczyć równoważną średnicę kropelek na podstawie parametrów projektowych. Krzywe uzyskane przy pomocy wzoru określają zależność średnicy kropelek względem parametrów technicznych urządzeń. W artykule proponuje się ponadto metodę obliczania absorpcji ciepła w zależności od średnicy kropelek oraz wpływu dyspersji na intensywność podawania wody w trakcie pożaru.

**Słowa kluczowe:** produkty spalania, spadek temperatury, redukcja produktów spalania, dyspersja kropelek wody, zwiększenie widoczności, klasyfikacja metod rozpylenia wody, rozpylanie pneumo-hydrauliczne, dysze odśrodkowe, równoważna średnica kropełek

Введение. Непрерывное развитие науки и техники, рост пожароопасных производств, усложнение технологических процессов, концентрация на производстве и в зданиях значительного количества горючих синтетических материалов значительно усложнили обстановку и условия для выполнения оперативных задач пожарно-спасательных подразделений ДСНС Украины по спасанию людей, эвакуации имущества, ликвидации пожаров, проведению аварийно-спасательных работ в загазованных и задымленных средах [1, 2].

Актуальность темы. Согласно статистическим данным за 2016 г. произошло 69 924 пожаров из них 50158 в жилом секторе. При ликвидации пожаров в жилом секторе в большинстве случаев используют звенья газодымозащитной службы (ГДЗС), что составляет более 20%. При этом большинство работы звеньев ГДЗС приходится в тяжелых условиях. Тяжелыми являются условия работы звеньев ГДЗС при пожарах в помещениях, где средняя объемная температура достигает от 200 С° и более в зависимости от стадии пожара и визуальная видимость снижается менее 3 м. Именно такие условия являются при тушении пожаров в подвалах, что обусловлено их конструктивными особенностями, а именно – малым количеством отверстий. Также на обстоятельства во время пожара большое влияние оказывает пожарная нагрузка, она в подвалах может достигать 50 кг / м<sup>2</sup> и более [1, 3, 6].

Для эффективного проведения аварийно-спасательных работ при пожаре в помещении звеньям ГДЗС нужно снизить температуру до 60–80 С° и увеличить видимость от 3 м до 6 м, что позволит не только эффективно но и безопасно работать в загазованных и задымленных помещениях. Этого можно достичь благодаря подаче распыленных струй воды для осаждения продуктов горения и использовать дымососы для отсоса продуктов горения или для нагнетания свежего воздуха. На практике пожарно-спасательные подразделения Украины используют стволы распылители и стволы типа Protek но они не являются эффективными поскольку не могут дать нужной дисперсии капель. [9]

Изложение основного материала. Согласно экспериментальным исследованиям, указанным в работе [4] полидисперсный поток с диапазонами капель от 300 до 400 мкм обеспечивает наибольший коэффициент захвата твердых частиц, то есть максимальную эффективность влажной очистки дымовых газов. В Украине и других высокоразвитых странах Европы и Америки используют в таких случаях дымососы. Анализ дымососов на пожарах показывает, что нагнетание свежего воздуха в помещение является более эффективным по сравнению с отсосом дымовых газов [4, 5]. Как указано в работе [12] во Львовском государственном университете безопасности жизнедеятельности была разработана установка (рис. 1), которая сочетает одновременно подачу мелко дисперсной огнетушащего вещества и свежего воздуха [8]. Но в этой установке (рис. 1 позиция 8) не рассмотрены конструктивные

особенности насадки-распылителя (форсунки) и ее тактико-технические характеристики, а именно давления подачи огнетушащих средств и диаметра выходного отверстия.

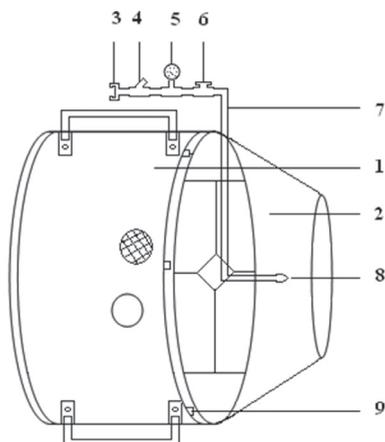


Рис. 1. Конструкция устройства для осаждения продуктов горения и снижения температуры

1 – осевой пожарный дымосос; 2 – корпус устройства; 3 – муфтовая соединительная головка; 4 – фильтр воды; 5 – манометр; 6 – перекрывной кран; 7 – патрубок; 8 – насадка-распылитель; 9 – крепление устройства к дымососу.

Для эффективного подбора устройства для подачи тонкораспыленной воды рассмотрим классификацию способов распыления воды на мелкодисперсные частицы. Согласно данной классификации ее разделяют по следующим признакам: механическое распыление, гидравлическое, пневматическое, акустическое, электростатическое, ультразвуковое, пульсационное, электрогидравлическое, комбинированное и распыление с предыдущим газонасыщением [10].

Наиболее приемлемыми способами распыления воды из выше приведенных, которые используются на практике для осаждения продуктов горения, является гидравлическое и пневматическое распыление. У гидравлического распыления основным энергетическим фактором, который приводит к распаду воды на капли, является давление нагнетания. Проходя через распыляющее устройство, водяной поток набирает очень высокую скорость и превращается в форму, которая обеспечивает быстрый и эффективный распад капель на части.

При пневматическом распылении энергия подводится к воде путем динамического ее взаимодействия с высокоскоростным потоком воздуха. Благодаря большой скорости потока в распылителе или за его пределами вода сначала распыляется на отдельные ниточки, которые затем распадаются на капли.

В нашем случае мы используем комбинированный способ распыления [8]. Это сочетание двух приведенных выше способов, который позволяет получить такие характеристики распыления воды, которые невозможно обеспечить при использовании каждого из них в отдельности. То есть, сочетание пневматического и гидравлического способов (пневно-гидравлическое распыление), с помощью которого получаем распыления с дисперсными характеристиками, которые не уступают полученным при пневматическом распылении, но при меньших затратах энергии.

На процесс распыления капель (рис. 2) влияют физические свойства воды в окружающей среде. Например, вязкость воды вызывает стабилизирующее действие, которое затрудняет развитие волновых явлений, а, соответственно, и распыление воды. Также при увеличении поверхностного натяжения воды наблюдается уменьшение ее распыления.

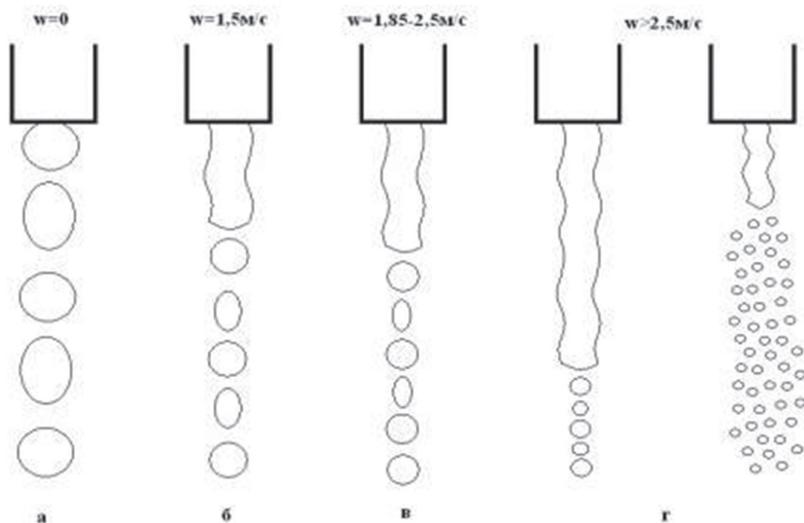


Рис. 2. Расщепление цилиндрических струй воды при постепенном увеличении скорости потока воздуха

Механизм распыления капель, которые выходят из распылителя, зависит от формы потока что вытекает и соотношения скоростей потока и окружающих газов, которые зависят от способа распыления и конструкции распыляющего устройства [10]. При постепенном увеличении скорости нагнетания (начиная от нулевого значения) наблюдается следующее явление: сначала вода выходит из сопла в виде отдельных капель (рис. 2а). Увеличение скорости до 1,5 м/с приводит к превращению короткой струи и неравномерных капель (рис. 2б). После отрыва капля образуется неравномерное расширение по длине струи. Под действием давления в расширении меньшего диаметра вода перетекает в расширение большего диаметра. Слияние или неслияние соседних расширений приводят к неравномерности и к увеличению крупной фракции полученных капель. При скорости потока воды 1,85–2,5 м/с образуются наиболее равномерные капли (рис. 2в). При скорости потока более 2,5 м/с длина струи увеличивается почти до максимума (рис. 1г). Число капель одинакового размера при этом уменьшается, так как при увеличении скорости нагнетания потоком воздуха, образуются маленькие капли.

Чаще всего комбинированный способ распыления капли применяется в центробежных форсунках. Принцип действия центробежной форсунки заключается в закручивании воды, проходящей через нее. Поток воды в форсунке обусловлен действиями момента количества движения каплей относительно сопла, который возникает при закручивании воды. Вода движется вдоль стенки соплового канала форсунки в виде вращающейся пленки, а ядро потока заполняет так называемый воздушный вихревой поток. При истечении из сопла водяная пленка распадается, образуя факел в виде конуса, частицы которого разлетаются по прямолинейным траекториям.

Рассмотрев типы форсунок (рис. 3): «Спиральные форсунки»; «Плоское распыление»; «Полный конус», было определено, что наиболее эффективный тип форсунки является «Полный конус» (рис. 2 позиция 3). Благодаря своей конструкции форсунка типа «Полный конус» разбивает поток воды, образуя своеобразную водную пыль (мелкие капли). При этом твердые частицы, которые образуются в продуктах горения (дыма) увлажняются, то есть становятся тяжелыми и оседают, благодаря чему увеличиваются видимость. Это позволяет существенно

охладить пораженные очагом возгорания области. При этом контактирующие с теплом капли превращаются в пар, который уменьшает концентрацию кислорода окружающей среды и происходит профилактика повторного возникновения пожара путем нейтрализации высокой температуры в очаге возгорания.



Рис. 3. Типы форсунок: 1 – «Спиральные»; 2 – «Плоское распыление»; 3 – «Полный конус»

Как указано в научной работе [7] для достижения в потоке нужной дисперсии необходимо определить диаметр форсунки и давление подачи огнетушащего вещества. Для расчета скорости потока воды  $u_0$  в выходном отверстии оросителя можно воспользоваться теорией движения жидкостей через отверстия и насадки [13–14]. В данном случае ороситель можно рассматривать как насадок специфической формы, характеризующийся соответствующими параметрами: коэффициентом сжатия струи  $\varepsilon_j$ ; коэффициентом скорости струи  $\varphi_j$  и коэффициентом расхода жидкости  $\mu_j = \varepsilon_j \cdot \varphi_j$ .

По данным экспериментальных исследований известно, что эти коэффициенты зависят от числа Рейнольдса  $Re$  для струи, но при достаточно больших значениях  $Re$ , превышающих  $\sim 10^4$ , их величины выходят на постоянные уровни, зависящие от конструкции насадка. Элементарный расчет показывает, что для типичных режимов работы противопожарных оросителей условие  $Re > 10^4$ , как правило, выполняется.

Коэффициент сжатия существенно отличается от единицы для отверстия в тонкой стенке, но для всех основных типов насадок  $\varepsilon_j = 1$  [13–14]. Другие два коэффициента по определению равны:

$$\varphi_j = \frac{u_0}{u_j}, \quad (1)$$

$$\mu_j = \frac{Q_{noz}}{Q_j}, \quad (2)$$

где  $Q_{noz}$  – расход воды оросителя (объем воды за единицу времени),  $u_j$  и  $Q_j$  – скорость потока воды и расход воды оросителя для идеальной жидкости, которые можно определить через избыточное давление воды в оросителе  $p$  с помощью уравнения Бернулли. Для данного случая это уравнение имеет вид:

$$\frac{\rho_w \cdot u_j^2}{2} = p,$$

откуда:

$$u_j = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}.$$

Из (3) получим:

$$u_0 = \varphi_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}. \quad (3)$$

Для определения коэффициента скорости  $\varphi_j$  воспользуемся тем обстоятельством, что как указано выше,  $\varepsilon_j = 1$ , то  $\mu_j = \varepsilon_j \cdot \varphi_j = \varphi_j$ , т.е. коэффициент скорости оросителя численно равен его коэффициенту расхода. Расход воды для идеальной жидкости:

$$Q_j = S_{noz} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}. \quad (4)$$

В паспорте каждого оросителя, как правило, представлена (в табличном виде) экспериментально измеренная зависимость:

$$Q_{noz} = K \cdot \sqrt{p}, \quad (5)$$

а также указана величина коэффициента  $K$  ( $K$ -фактор). Однако, следует иметь в виду, что численное значение  $K$ -фактора для расчетов необходимо перевести к единицам системы СИ и определить соответствующую величину  $K_{SI}$  – Подставляя (6) и (7) в (4), получим:

$$\mu_j = \varphi_j = K_{SI} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{2}} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_0^2}. \quad (6)$$

И наоборот, если для данной конструкции оросителя известно значение коэффициента расхода  $\mu_j$ , можно определить величину  $K_{SI}$  для заданного значения  $d_0$ :

$$K_{SI} = \mu_j \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_w}} \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}. \quad (7)$$

Согласно выполненным расчетам [15], при  $\sigma < 0.8$  эквивалентный диаметр капель СРВ  $D_{eq} \approx D_{32}$ . Отсюда, подставляя (10) в (11), найдем для эквивалентного диаметра капель:

$$D_{eq} = C_0 \cdot e^{\frac{-\sigma^2}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{d_0}{\mu_j}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot p^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Это соотношение позволяет решить важнейшую задачу конструкторского расчета системы противопожарной защиты на основе водяных завес. Она дает возможность определить экранирующие свойства водяной завесы (с помощью математической модели [15, 37]) на основе технических параметров оросителей без выполнения трудоемких и сложных измерений распределения капель по диаметрам.

Формула (8), однако, не позволяет в каждом случае выполнить количественный расчет эквивалентного диаметра капель СРВ до тех пор, пока экспериментально не определен неизвестный коэффициент  $C_0$  (параметр дисперсности), зависящий от конструкции оросителя.

Все же эта формула дает возможность сделать грубую оценку эквивалентного диаметра капель для оросителей простейшей конструкции, к числу которых относятся щелевые оросители для водяных завес. На основе обобщения результатов экспериментальных исследований известно, что величина параметра дисперсности для подобных оросителей находится в пределах  $1.74 < C_0 < 3.21$  [38]. Если этот интервал действительно соответствует всем возможным значениям параметра дисперсности, то, выбирая среднее из данного интервала  $C_0 = 2,5$  при расчете  $D_{eq}$ , мы не сделаем ошибку более 30%. При таком способе выбора параметра дисперсности  $C_0$  формула (8) является оценочной, т.е. не требует высокой точности расчетов.

Кроме того, формула (8) дает ценную информацию о характере зависимости эквивалентного диаметра капель СРВ от параметров  $d_0$ ,  $p$  и  $\sigma$  и это дает возможность выработать методы оптимизации параметров СРВ в каждом случае конкретных условий теплового экранирования. Чтобы оценить численные параметры и характер этой зависимости, на рис. 4 представлены результаты расчета графиков  $D_{eq}(p)$  и  $D_{eq}(d_0)$ , полученных с помощью формулы (8). Для расчета были заданы значения  $\sigma = 0,5$ ,  $\mu_j = 0,7$  и  $C_0 = 2,5$ .

На основании теоретических исследований получена зависимость эквивалента диаметра капель струй распыленной воды от технического параметра насадки распылителя и давления. (Рис. 4).

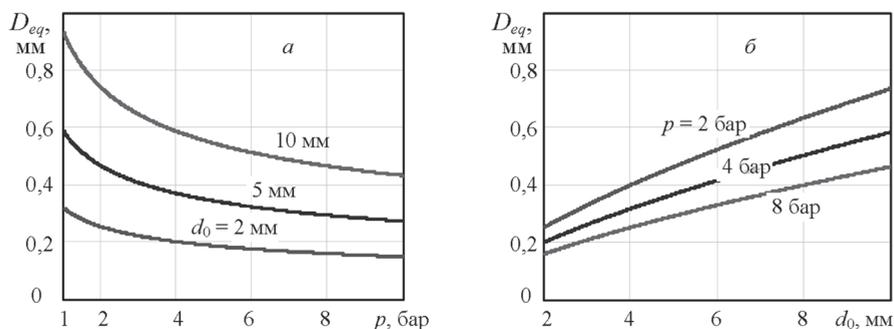


Рис. 4. Зависимость эквивалента диаметра капель струй распыленной воды от технического параметра насадки распылителя

Результаты теоретических исследований дисперсности капель воды в зависимости от диаметра выходного отверстия и давления наведения в таблице 1

Таблица 1. Дисперсность капель воды в зависимости от диаметра выходного отверстия и давления

№	Диаметр выходного отверстия $d_0$ , мм	Давление выходного отверстия P, бар			
		2	4	6	8
1	2	0,27673	0,21964	0,19187	0,17433
2	5	0,50974	0,40458	0,35344	0,32112
3	6	0,57562	0,45687	0,39911	0,36262
4	8	0,69732	0,55346	0,48349	0,43928
5	10	0,80916	0,64223	0,56104	0,50974

В научной работе [11] проведен анализ влияния дисперсности распыленной воды на теплообмен между каплями, которые двигаются и продуктами горения (дыма). Выбор способа тушения пожара, вида и расхода огнетушащего средства определяется классом пожара и его характерными параметрами. При тушении способом охлаждения основным огнетушащим средством является вода или водные растворы. В этом случае, характерным параметром для расчёта расхода воды является площадь пожара (площадь поверхности горения). Согласно [16] расход воды рассчитывается по формуле:

$$V\tau = SI, \quad (9)$$

где  $V\tau$  - расход огнетушащего средства,  $\text{м}^3/\text{с}$ , (кг/с);

$S$  - площадь пожара,  $\text{м}^2$ ;

$I$  - требуемая интенсивность подачи воды, под которой понимают количество огнетушащего средства, подаваемого в единицу времени на единицу площади пожара  $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , (кг/(\text{м}^2 \cdot \text{с})).

Интенсивность подачи воды является справочной величиной, нормативная база которой формировалась практикой. Экспериментально его определяют как:

$$I = \frac{v}{\tau}, \quad (10)$$

где  $v$  – фактический удельный объем воды, необходимый для прекращения горения, величина нормированная на  $1 \text{ м}^2$  горячей поверхности,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ , ( $\text{кг}/\text{м}^2$ );

$\tau$  – время прекращения горения, с.

Считается [16], что интенсивность подачи воды практически не зависит от размеров площади пожара, но на нее влияют размеры пожарной нагрузки, её расположение по высоте помещения и доступность поверхности горения для контакта с водой. В зависимости от горящих конструкций и материалов согласно [16] интенсивность подачи воды рекомендуется принимать от  $0,06 \text{ дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$  ( $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ) (административные здания, жилые дома, деревянные сараи) до  $0,45 \text{ дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$  ( $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ) (пиломатериалы в штабелях при влажности 8–14%). Применение данных норм обосновано практически, когда в качестве технических средств подачи воды применяются стволы и насосы, обеспечивающие распыление её капель размером 500–1100 мкм. Методика оценки и анализ эффективности такого способа распыления воды для охлаждения зоны горения при тушении пожаров приведены в работах [17–18].

Вместе с тем в настоящее время всё более широкое применение, особенно при тушении пожаров в городских условиях, находит тонкое распыление воды. Однако, обоснованных норм подачи тонко распылённой воды для практического применения в научно-технической литературе и современных инструкциях не содержится. В связи с этим вопрос о пересмотре существующих норм интенсивности подачи воды в зону горения применительно к новым технологиям пожаротушения становится актуальным.

Интенсивность подачи во многом определяется эффективностью охлаждения продуктов горения распылённой водой. Поэтому для решения данной проблемы необходимо провести исследование степени влияния дисперсности распыленной воды на теплообмен между движущимися каплями и дымовыми газами, что и является целью данной работы.

Теплообмену капель воды с высокотемпературной газовой средой посвящён ряд теоретических работ [19–31]. Все математические модели, представленные в этих работах, построены с учётом тех или иных допущений. Так, в работах [19–21, 31] при решении задачи не

учитывались ослабляющие свойства продуктов горения. В [22–26, 29] представлены результаты, рассчитанные без учёта времени прогрева капель до момента их интенсивного испарения. В [30] авторы, используя феноменологический подход, исследовали процесс охлаждения газа без учёта дисперсности капель в его потоке. Из всех перечисленных работ, только в [20], а также в [27,28] рассмотрен вопрос влияния дисперсности капель распылённой воды на охлаждение продуктов горения. В [20] приведены результаты исследования динамики охлаждения газов каплями воды для диапазона их диаметров 200–2000 мкм. В отличие от [26] авторами [20] выявлено оптимальное значение диаметра капель воды 700 мкм, обеспечивающее максимальную интенсивность теплоотвода. Это слабо согласуется с практическим опытом, реализуемым в устройствах подачи воды в современных пожарных автомобилях, где диаметр распыляемых капель стремятся довести до 50 мкм и мельче. Хотя в целом все перечисленные модели качественно отражают физическую сущность процесса охлаждения продуктов горения, тем не менее, этих результатов не достаточно для обоснования норм интенсивности подачи тонкораспылённой воды. Несомненно, что теоретические результаты должны быть скорректированы с учётом результатов экспериментальных исследований и практического опыта.

Рассмотрим следующий случай [32]. Горение происходит в помещении размером  $a \times b \times h$ . Горит материал с низшей теплотой сгорания, МДж/кг; удельная скорость выгорания материала  $\Psi$ , кг/м<sup>2</sup>·с, не изменяется во времени. Очаг пожара не увеличивается в размерах, и тепловой поток в направлении ограждений помещения величина постоянная. Помещение имеет проём для поступления воздуха не более 0,25 м<sup>2</sup>, что, как показано в [33], приводит к тому, что среднеобъёмная температура дымовых газов в помещении не превышает  $t_1 = 250^\circ\text{C}$ .

Охлаждение дымовых газов осуществляется распыленной водой, капли которой падают свободно. Распределение капель по площади  $a \times b$  равномерное. Путь, проходимый падающей каплей  $h_p$ , ограничен временем нагрева капли  $\tau_k$  от начальной температуры  $t_0$ , °С до температуры насыщения воды при атмосферном давлении  $t_r = 100^\circ\text{C}$ . Расход воды  $V_r$ , м<sup>3</sup>/с, подаваемой в помещение принимаем постоянным. Его величина может быть выражена из уравнения теплового баланса, записанного для термодинамической системы «дымовые газы - вода»:

$$\begin{cases} Q_{\text{дг}} = Q_{\text{в}} \\ Q_{\text{дс}} = Q_{\text{в}}^p S \Psi \\ Q_{\text{в}} = V_{\tau} (\rho c)_{\text{в}} (t_{\tau} - t_0), \end{cases} \quad (11)$$

где  $Q_{\text{дг}}$  - количество теплоты, поглощаемое дымовыми газами в результате горения, кВт;

$Q_{\text{дс}}$  - количество теплоты, забираемое водой от дымовых газов, кВт;

$(\rho c)_{\text{в}}$  - объёмная теплоёмкость воды, кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Тогда, из соотношений (11) выражение для расхода воды имеет вид:

$$V_{\tau} = \frac{Q_{\text{в}}^p S \Psi}{(\rho c)_{\text{в}} (t_{\tau} - t_0)}. \quad (12)$$

Методика расчёта теплообмена между падающими каплями и дымовыми газами в закрытом объёме базируется на экспериментальных результатах, представленных в [34–36].

Теплообмен капли с дымовыми газами является сложным и характеризуется суммарным коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\pi}, \quad (13)$$

где конвективный коэффициент теплоотдачи определяется как:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{Nu \lambda_{\tau}}{d}, \quad (14)$$

а коэффициент излучения:

$$\alpha_{\pi} = \frac{q_{\pi}}{(T_{\tau} - T_{\text{к}})}, \quad (15)$$

где  $Nu$  число Нуссельта;

$\lambda_{\tau}$  - теплопроводность дымовых газов при средней температуре, Вт/(м·К);

$d$  - диаметр капель, м;

$q_{\pi}$  - плотность лучистой составляющей теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$T_{\tau}$  - температура дымовых газов, К;

$T_{\text{к}}$  - средняя температура капли, К, которая определяется как:

$$T_K = T_r - \Delta t, \quad (16)$$

где  $\Delta t$  – среднелогарифмическая разность температур между дымовыми газами и каплей, °С.

$$\Delta t = \frac{(t_r - t_0) - (t_r - t_r)}{\ln\left(\frac{t_r - t_0}{t_r - t_r}\right)}, \quad (17)$$

где  $t_0, t_r$  – соответственно, температура капель в начальный и конечный моменты падения капли, °С.

Согласно [34] для расчёта числа Нуссельта  $Nu$  между каплями и газовым потоком использовалась формула А.В. Нестеренко:

$$Nu = Nu_0 + ARe^n Pr^{0,33} Gu^{0,175}, \quad (18)$$

где  $Nu_0 = 2$  – критерий Нуссельта при  $Re = 0$  (когда  $Nu > 80$  величиной  $Nu_0$  можно пренебречь);

$Re = \frac{\omega d}{\nu_r}$  – число Рейнольдса, где  $\omega$  – скорость падения капли относительно скорости газа, м/с;

$d$  – диаметр капли, м;

$\nu_r$  – кинематическая вязкость газа при средней температуре, м<sup>2</sup>/с;

$Pr$  – критерий Прандтля;

$Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c}$  – критерий Гухмана, где  $T_c$  и  $T_m$  – температуры газа по сухому и мокрому термометрам, К.

Численные значения  $A$  и  $n$  в зависимости от  $Re$  представлены в [34].

Скорость падения капли относительно скорости газа определяется из соотношения:

$$\omega = \omega_{\text{вит}} \pm \omega_r, \quad (19)$$

где  $\omega_{\text{вит}}, \omega_r$  – скорость витания капли и скорость газа, м/с (“+” – при противотоке, “-” при прямотоке).

Скорость витания капли может быть определена методом ЦКТИ, в котором уравнение равновесия подъёмной силы и силы тяжести представлено в виде критериальной зависимости:

$$Fe = d \left( \frac{4g(\rho_K - \rho_r)}{3\nu_r^2 \rho_r} \right) = (Re_{\text{вит}}^2 \xi)^{0,33}, \quad (20)$$

где

$Fe$  – критерий Федорова;

$d$  – диаметр капель, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_k, \rho_g$  – плотности капли и газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu_g$  – кинематическая вязкость газа при средней температуре, м<sup>2</sup>/с;

$Re_{\text{вит}}$  – число Рейнольдса при скорости витания капля;

$\xi$  – коэффициент лобового сопротивления капли в газовом потоке.

Отсюда скорость витания капли в потоке газа:

$$\omega_{\text{вит}} = \frac{Re_{\text{вит}} \nu_g}{d}, \quad (21)$$

Вклад излучения газа в плотность теплового потока на поверхности капель (15) рассчитывали по формуле:

$$q_{\pi} = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_k C_0}{\varepsilon_g + \varepsilon_k (1 - \varepsilon_k)} \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_k}{100} \right)^4 \right], \quad (22)$$

где  $\varepsilon_g, \varepsilon_k = 0,95$  – соответственно степени черноты газов и воды;

$C_0 = 5,7$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела, (Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Степень черноты газов определяли согласно методике [35, 36]:

$$\varepsilon_g = 1 - \exp(-kpl), \quad (23)$$

где  $k = k_g r_n$ ,

где  $k_g$  – коэффициент ослабления лучей 3-атомными газами, содержащимися в продуктах сгорания, определяемый по опытной формуле:

$$k_g = (0,8 + 1,6r_{H_2O})(p_n l)^{-0,5} (1 - 0,38 \frac{T_f}{100}), \quad (24)$$

Где  $r_{H_2O}$  – объёмная доля водяных паров ( $r_{H_2O} = 0,11$ );

$p_n = r_n p$  – суммарное парциальное давление 3-атомных газов.

Для газов при атмосферном давлении  $p = 0,1$  МПа содержание 3-атомных газов составит  $r_n = r_{H_2O} + r_{CO_2} = 0,11 + 0,13 = 0,24$ .

Эффективная толщина излучающего газового слоя:

$$l = 0,9 \left( 4 \frac{V_c}{F_n} \right), \quad (25)$$

где  $V_c$  – объём излучающего слоя, м<sup>3</sup>;

$F_n$  – площадь ограждающих поверхностей, м<sup>2</sup>.

Для системы, содержащей капельки воды из формулы (25) следует:

$$l = 3,6 V_c F_n \frac{1 - \varphi}{1 + \frac{6\varphi}{d} V_c F_n}, \quad (26)$$

где  $\varphi = \frac{V}{V_c}$  – объемная концентрация капель.

Количество тепла, воспринимаемое одной каплей, составляет, Дж:

$$q = \alpha \Delta t f_K \tau_K, \quad (27)$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, определяемый по соотношению (13);

$\Delta t$  – разность температур между дымовыми газами и каплей (17);

$f_K = \pi d^2$  – площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>;

$d$  – диаметр капли, м;

$\tau_K$  – время нагрева капли от начальной температуры  $t_0$  до конечной  $t_r$ .

Общее количество теплоты, аккумулированное всей массой распыленной воды, составит, Дж:

$$Q = qn = \alpha \Delta t F_K \tau_K, \quad (28)$$

где число капель, образовавшихся в результате распыления объёма воды  $V$ :

$$n = \frac{6V}{\pi d^3}, \quad (29)$$

общая площадь поверхности капель (поверхность теплообмена) распыленной воды:

$$F_K = f_K n. \quad (30)$$

Расчёт теплообмена между распылённой водой и дымовыми газами проводился следующим образом. Первоначально ориентировочно задавались температурой  $t_\tau$  в конечный момент падения капли  $\tau_k$  и затем, варьируя этим параметром, методом последовательных приближений вели расчёт до тех пор, пока последнее расчётное значение температуры:

$$t_\tau^p = t_0 + \frac{6q}{(\rho c)_k \pi d^3}, \quad (31)$$

не совпадало с последним заданным  $t_\tau$ . Если капля испаряется, не успев пролететь всю высоту помещения, тогда принимается параметр  $t_\tau = 100^\circ\text{C}$ , а варьируется параметр  $h_\tau$  до тех пор пока  $h_\tau = 100^\circ\text{C}$ .

Достоверность представленного метода подтверждается независимым решением задачи о теплопроводности капли. В данной задаче каплю рассматривали как термически тонкое тело сферической формы.

Безразмерная температура сферической капли определялась как:

$$\Theta = \exp(-3F_0 Bi), \quad (32)$$

где  $F_0 = \frac{4\alpha_k \tau}{d^2}$  – число Фурье (где  $\alpha_k$  температуропроводность воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ );

$Bi = \frac{\alpha d}{2\lambda_k}$  – число Био;

$\lambda_k$  – теплопроводность воды, ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ).

Тогда размерная температура:

$$t_\tau^\lambda = t_G - \Theta(t_G - t_0). \quad (33)$$

Количество теплоты, аккумулированное одной каплей:

$$q^\lambda = q_0(1 - \Theta), \quad (34)$$

где  $q_0 = \rho_k \frac{4\alpha_k \tau}{d^2} C^k(t_G - t_0)$ .

Для проверки сходимости конвективной задачи с задачей о теплопроводности использовался пакет стандартной компьютерной программы Mathcad 13. Во всем диапазоне варьируемых температур  $0 < t_\tau < 100^\circ\text{C}$  и размеров капель  $0,1 < d < 1$  мм расхождение решений

конвективной задачи и задачи о теплопроводности  $\varepsilon = \left| \frac{q - q^{\lambda}}{q} \right| 100$ , не превышало 1 %.

Согласно постановке задачи, расчёт исследуемых параметров проведён для следующих исходных условий: горючий материал в помещении – штабель древесины, её нижняя теплота сгорания  $Q_H^p = 16,9$  МДж/кг; удельная скорость выгорания материала  $\Psi = 0,0162$  кг/(м<sup>2</sup>·с); площадь пожара  $S = 1$  м<sup>2</sup>; среднеобъёмная температура дымовых газов в помещении  $t_T = 250^{\circ}\text{C}$ ; температура воды в начальный и конечный моменты падения капли составляла соответственно  $t_0 = 16^{\circ}\text{C}$ ,  $t_T = 99^{\circ}\text{C}$ . Дисперсность капель варьировалась в диапазоне  $0,1 < d < 1$  мм. Рассматривалась адиабатная задача.

Количество теплоты, поглощаемое дымовыми газами в результате горения, и расход охлаждаемой воды, подаваемой в помещение, согласно формулам (11, 12) соответственно составили:

$$Q_{\text{дг}} = 16,9 \cdot 10^6 \cdot 0,0162 = 241,1 \text{ кВт}; \quad V_T = 0,72 \text{ дм}^3/\text{с}.$$

Во всём исследуемом диапазоне параметра  $d$  разница между величинами  $Q_{\text{дг}}$  и не превышала 1 %.

Проведём анализ влияния дисперсности распылённой воды на теплообмен между движущимися каплями и дымовыми газами. Как следует из уравнения (28), при условии, что  $\Delta t = \Delta t_{\text{max}} - \text{const}$ , основными характеристиками теплообмена являются суммарный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , общая площадь поверхности капель  $F_K$  и время нагрева капли  $\tau_K$  до температуры насыщения воды при атмосферном давлении  $t_T = 100^{\circ}\text{C}$ . Зависимости параметров  $\alpha$  и  $\tau_K$  от дисперсности капель представлены соответственно на рисунке 5. Как видно из графика зависимости коэффициента теплоотдачи от диаметра капель воды  $\alpha-f(d)$  (рис. 5) снижение уровня их дисперсности ведёт к росту коэффициента теплоотдачи. Причём темп возрастания на участке  $d < 0,4$  мм значительно выше, чем на участке  $d > 0,4$  мм. Таким образом, при разработке новых технических устройств для подачи распылённой воды необходимо закладывать конструктивные параметры, которые обеспечат дисперсность капель порядка 0,1 мм, возможно и мельче. В численном выражении уменьшение размера капель с 1 до 0,1 мм (в 10 раз) привело к увеличению суммарного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в 2,4 раза (480–1154 Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

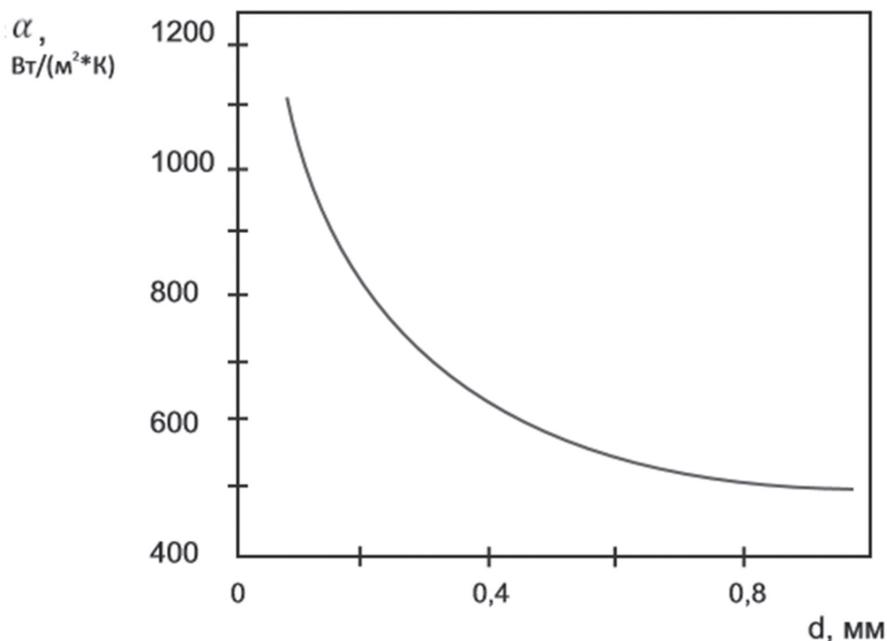


Рис. 5. – Зависимость коэффициента теплоотдачи от размера капель

Исследование показало, что характер кривой  $\alpha - f(d)$  имеет более сложную, чем степенную зависимость. Следует также отметить о несущественном влиянии излучения на величину суммарного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ . Для условий данной задачи вклад коэффициента излучения не превышал 1 %.

В нашем случае, исходя из теплового баланса системы, зависимость  $F_k - f(d)$  обратно пропорциональна зависимости  $\alpha - f(d)$  и поэтому её график здесь не приводится. Сокращение поверхности теплообмена с уменьшением размеров капель обусловлено как снижением скорости падения капель, так и сокращением времени их нагрева  $\tau_k$ . Для исследуемого диапазона размера капель снижение скорости их падения составило 30,6 раза  $\left(\frac{4,13 \text{ м/с}}{0,135 \text{ м/с}}\right)$ , а время нагрева сократилось в 24 раза  $\left(\frac{0,618 \text{ с}}{0,026 \text{ с}}\right)$ .

**Выводы.** Итак, проведя анализ теоретических исследований, устройств и приборов, используемых для снижения температуры и осаждения продуктов горения (дыма) для увеличения видимости было определено, что наиболее эффективными являются комбинированные устройства, которые обеспечивают получение дисперсии

капель воды и огнетушащих растворов от 300 до 400 мкм, составляет от 0,3 до 0,4 мм. Причем темп роста коэффициента теплоотдачи значительно выше при диаметре капель  $d \leq 0,4$  мм, по сравнению с каплями  $d > 0,4$  мм. Для этого подходит форсунка типа «Полный конус» с диаметром выходного отверстия 5 мм при давлении подачи на нее огнетушащего вещества от 4 до 6 бар. В дальнейшем будут продолжены работы в данном направлении и проводиться экспериментальные исследования в лабораторных и полигонных условиях.

## Литература

- [1] Наказ МНС України від 16.12.2011 №1342 «Настанова з організації газодимозахисної служби в підрозділах Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту».
- [2] Наказ МНС України від 13.03.2012 № 575 «Статутдій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту».
- [3] Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2016 рік.
- [4] Виталий Мирошниченко «Технологии дымоподавления» // «BESTOFSECURITY». – 2007. – №15.
- [5] Ковалишин В. В., Луц В. І., Пархоменко Р. В. навчальний посібник: Основи підготовки газодимозахисника, – Львів: ЛДУ БЖД, 2015 – 379 с.
- [6] Ключ П. П., Палюх В. Г., Пустовой А. С., Сенчихін Ю. М., Сировой В. В., /Пожежна тактика: Підручник – Х.: Основа, 1998. – 592 с.
- [7] Виноградов А.Г. Эквивалентный диаметр капель струй распыленной воды и его зависимость от технических параметров / А.Г. Виноградов, О.М. Яхно // Вісник НТУУ «КПІ» – К. : Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2016. – № 1(76). – С.39 – 45.
- [8] Патент UA № 55428 А 62 С 35/00 Пристрій для осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях/ Ковалишин В.В., Луц В.І., Мельник П.І. (України).4с; Опубл. 10.12.2010, бюл. №23.
- [9] Пам'ятка для пожежного рятувника / Уклад. В. І. Луц, О. В. Лазаренко / – Львів: ЛДУ БЖД, 2015. – 68 с.

- [10] Пажи Д.Г, Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. С. 10–15.
- [11] Дударев В.В. Влияние дисперсности распылённой воды на интенсивности её подачи при тушении пожара в закрытом объёме / В.В. Дударев, О.Г. Горовых, С.Н. Бардушко, И.А. Шмулевцов, С.Н. Бобрышева // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К. : УкрНДІПБ. – 2009. – № 1(19). – С.149–157.
- [12] Луц В.І. Підвищення ефективності застосування переносних пожежних димовсмоктувачів / В. І. Луц, О. В. Лазаренко, Н. О. Штангрет // Збірник наукових праць: «Пожежна безпека». Львів.2016. – № 28. – С.88–94.
- [13] Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М., Недра, 1982. – 224 с.
- [14] Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
- [15] Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45–57.
- [16] Кимстач Ф., Девлишсв П.П., Евтюшкин П.М. Пожарная тактика. М.: Стройиздат, 1984. – 591 с.
- [17] Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.
- [18] D.J. Rasbash. The extinction of fires by Water spray // Fire research abstracts and reviews. – 1962. – Vol. 4. – P.28–53.
- [19] Провести исследования и разработать исходные требования на новые виды пожарных машин и оборудования (Гидравлическое оборудование): Заключительный отчет / ВНИИПО МВД СССР; руководитель В.Л. Варганов. – № ГР 01890030326. – М., 1988. – 232 с.
- [20] Провести исследование по определению области применения тонкораспыленной (перегретой) воды и разработать рекомендации по тактике пожаротушения: Заключительный отчет / ВНИИПО МВД СССР; руководитель И.Ф. Безродный. – М., 1990. – 115с.
- [21] R. Natarajan, A.K. Ikosh. Dynamics of Vaporizing Drops Injected into Stagnant Gas // 2-Phase Momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical Processes and Energy Engineering Systems. Ed. Durst et al. – 1979. – Vol. I. – P. 133–144.

- [22] Gogos G., Aygasvamy P.S. A Model for the Evaporation of a Slowly Moving Drop // *Combustion and Flame*. – 1988. – Vol. 74, N 2. – P. 111-119.
- [23] Dumarque P, Audebert P. Evaporation convective d'une particule spherique liquide a faible nombre de eynolds dans un gaz a haute temperature // *Ann. Phys. (Fr)*. – 1988. – Vol. 13, N 3. Collouque N2. – P. 81–88.
- [24] Дикий Н.А., Мочалов А.Н., Павлищев В.И. и др. Исследование процессов тепло – и массообмена с учётом пограничного слоя испаряющейся капли на релаксационном участке // *Труды НКИ*, – 1975. – №97.
- [25] S.K. Lee., T.J. Chung. Axisymmetric Unsteady Droplet Vaporisation and Gas Temperature Distribution // *Trans ASME. J. Heat Transfer*. – 1989. – Vol. 3, N 2. – P. 487–494.
- [26] Кухно А.Н., Фёдоров А.П., Абрамов В.С. Тепломассообмен потока капель в горячем воздухе // *Пожаротушение*. – М., 1986. – С. 9–17.
- [27] L.M. Pietrzfk, G.A. Iohanson. Directions for Improving Manual Fire Suppression Using a Physically Based Computer Simulation // *Fire Technology*. – 1986. – Vol. 22. – № 3.
- [28] L.M. Pietrzfk, J.A. Ball. Investigation to Improve the Effectiveness of Water in the Suppression of Compartment Fires // *Fire Research*. – 1978. – Vol. 1. – P. 291–300.
- [29] Дикий Н.А., Мочалов А.А., Павлищев В.И., Шевцов А.П. Методика расчёта контактного теплообменного аппарата с учётом полидисперсности распыла жидкости // *Труды НКИ*. – 1975. – № 100.
- [30] Козлюк А.И. Водоснабжение угольных шахт для борьбы с пожарами и пылью. – М.: Недра. – 287 с.
- [31] Безродный И.Ф., Пучков С.И., Филиппов В.Д. Расчёты траектории испаряющейся капли в среде с пространственно-неоднородными свойствами // *Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений*. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. С. 184–185.
- [32] Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. – М.: Академия Государственной противопожарной службы МВД России, 2000. – 118 с.
- [33] Лисицына О.Г., Бардушко С. Н. Особенности развития пожара в замкнутых помещениях жилых и административных зданий // *Вестник Полоцкого государственного университета*. – 2006, – №9.

- [34] Лебедев П.Д. Теплообменные сушильные и холодильные установки. – М., Л.: Энергия. 1966. – 288 с.
- [35] Теплотехника: Учеб. для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; под ред. А.П. Баскакова. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.: ил.
- [36] Теплотехника: Учеб. для вузов / А.А. Шукин, И.Н. Сушкин, Р.Г. Зах и др.; под ред. А.А. Шукина. – 2-е изд., перераб. – М.: Metallurgia, 1973. – 478 с.: ил.
- [37] Виноградов А.Г. Методика розрахунків параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів / А.Г. Виноградов // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 2 (28). – С. 127–139.
- [38] Dundas P.H. Technical Report Optimization of Sprinkler Fire Protection the Scaling of Sprinkler Discharge: Prediction of Drop Size / P.H. Dundas. – Factory Mutual Research Corporation No. 18792 RC73-T-40, Norwood, MA, 1974.